



# Application of Micron-sized Oleic-acid Covered Magnetite Particles in Co-sedimentation-demulsification of Water in Crude Oil Emulsion: identification of effective parameters

Mehdi Ghanbari<sup>1\*</sup>, Seyed Mohammad Jesmani<sup>2</sup>, Kobra Salehi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Department of Material and Metallurgical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering, Darab Branch, Islamic Azad University, Darab, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 11.04.2023

**Revised:** 03.06.2024

**Accepted:** 06.02.2024

### Keyword:

Magnetic Demulsifier  
Emulsion  
Interface  
Co-sedimentation  
Demulsification  
Separation

### \*Corresponding Author:

Mehdi Ghanbari

**Email:** [m-ghanbari@tvu.ac.ir](mailto:m-ghanbari@tvu.ac.ir)

## ABSTRACT

Produced crude oil from oil reservoirs contains enormous amounts of asphaltenes, resins, naphthenic acids and solid particles leading to the formation of stable salty water in oil emulsion. This can seriously disrupt the refinery process if the dispersed salty water phase is not separated from the crude oil. In this study, a wetted crude oil was dehydrated based on the increased weight of the dispersed droplets using the micron-sized oleic-acid-covered magnetite particles. This method does not necessarily require applying the magnetic field for the demulsification nor uses a surface-active additive. The magnetic responsiveness of the demulsifier can exclusively be utilized to recover the demulsifier. The effect of eight factors including rest time, temperature, pH, mixing time, magnetic wettability, mixing rate, salinity and the demulsifier dosage were evaluated on water removal efficiency. The results revealed that all of the mentioned factors were important; however, rest time, pH and temperature were more important. This method has a high dehydration rate and great potential applications for commercial and industrial use.



---

**EXTENDED ABSTRACT**

---

**Introduction**

Produced crude oil from oil reservoirs contains enormous amounts of asphaltenes, resins, naphthenic acids and solid particles leading to the formation of stable salty water in oil emulsion. This can seriously disrupt the refinery process if the dispersed salty water phase is not separated from the crude oil. Unfortunately, the prevalent method of the electrochemical desalting process is not capable of separating the suspended droplets within a high salt-content crude oil even in two stages. Therefore, numerous separation methods such as chemical and electrochemical demulsification, centrifugal deposition techniques, ultrasonic treatment, microwave irradiation desalination and more recently, magnetic dehydration have been proposed. Among these methods, the magnetic demulsification technique has been recently considered a promising technique. This method has the unique advantage of demulsifier recyclability and is therefore environmentally friendly.

**Methodology****Materials**

The micron-sized hydrophilic magnetite powder (Figure 1) was obtained from Kimia Mavad Co., Iran, with round-shape particles,  $\geq 98\%$  purity and an average size of 220 nm (Figure 2). The oleic acid,  $\geq 98\%$  purity, was purchased from the local market. The NaCl,  $\geq 99.5\%$  purity, was obtained from Merck Co. (Germany). The crude oil with the properties given in Table 1 was obtained from the Sarvestan oil field, an oil field in southern Iran. Distilled water was utilized throughout.

**Emulsion preparation**

A w/o emulsion was produced by mixing 120 mL of crude oil with 30 mL of deionized water. By adding 0 – 0.038 g NaCl, the water salinity was adjusted. In addition, its pH was set at 4 - 10 by adding the HCL and NH<sub>4</sub>OH solutions. The mixing was carried out using a laboratory mechanical stirrer (Mtops, MS-280D) at a speed of 2500 rpm for 30 min. The dispersed water droplets had an 11.51  $\mu\text{m}$  Sauter mean diameter (Figure 3). The produced emulsion had relatively good stability with no breaking for a week.

**Desalination process**

In a 50 ml vial, a specific amount of magnetic particles was added to 30 ml of the prepared emulsion. Then, they were mixed by a mechanical stirrer at a speed of 500-1500 rpm in a temperature range of 25-60 degrees Celsius for 200-30 seconds. When mixing was stopped, the clusters/flocs settled out within minutes and separated from the crude oil. Furthermore, the mixture was kept in a water bath at a constant temperature for 1 or 3 h, until the suspended lightweight magnetic agglomerates had a chance to re-settle by gravity. This period of time was called rest time. At each of these times, 5 mL of the dehydrated crude oil was withdrawn from the vial and poured into a 15 mL centrifugal graduated test tube.

The samples were mixed with 5 ml of toluene and placed in a shaker equipped with a constant temperature water bath for 10 minutes at 60°C. The tubes were finally centrifuged at 5500 rpm for 10 minutes. Unseparated water droplets and suspended magnetic clumps/clusters were collected at the bottom of the centrifuge tubes. Finally, the water removal efficiency was calculated using Equation 1.

Water removal efficiency (%) =  $(v_i - v_e) / v_i \times 100$  (Equation 1)

where  $v_i$  and  $v_e$  are the initial volume of water dispersed in 5 ml of the original emulsion (i.e. 1 ml) and the volume of unseparated water, i.e. water collected in the centrifugal tube, respectively.

### Results and discussion

The effects of eight independent factors including rest time, temperature, pH, salt content, magnetic wettability, mixing time, mixing rate, and magnetite dosage were taken into account using a two-level fractional factorial design to investigate their effects upon the co-sedimentation demulsification of water in crude oil emulsion. Based on the designed experiments, the observed and predicted values of the separation efficiency and magnetite residue are shown in Table 3.

### Conclusion

A new demulsification method was utilized to dehydrate crude oil. This method is based on increasing the weight of dispersed droplets using micron-sized magnetite particles. This method does not necessarily demand the application of the magnetic field for the demulsification nor uses a surface-active additive. However, the magnetic responsibility of the magnetite particles provides an opportunity for recycling. The effects of the eight factors including mixing time, rest time, temperature, mixing speed, pH, salinity, wettability, and magnetite dosage were evaluated using the fractional factorial design by Design-Expert version 7.1.5 on the water removal efficiency and the magnetite residue within the dehydrated crude oil phase. The results showed that all of the main effects were important, and the order of the five more significant factors for the water removal were rest time > pH > temperature > mixing time × rest time > mixing time. On the other hand, this order for magnetite residue was mixing time × MW/DWW > rest time > pH > temperature > mixing speed. According to the findings, whenever the magnetite residue decreased within the dehydrated oil phase, the water residue also decreased. The higher values of mixing time, mixing speed, temperature and rest time resulted in increasing the water removal. Overall, this method with a dehydration rate close to 100% is highly efficient and has great potential applications for commercial and industrial use.



## ذرات مغناطیسی میکرونی پوشیده با اسید اولئیک به منظور حذف نمک از نفت خام، شناسایی پارامترهای تأثیر گذار

مهدی قنبری<sup>۱\*</sup>، سیدمحمد جسمانی<sup>۲</sup>، کبری صالحی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۳- گروه مهندسی شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نفت خام تولیدشده از مخازن نفتی حاوی مقادیر زیادی آسفالتین، رزین، اسیدهای نفتیک و ذرات جامد است که منجر به تشکیل امولسیون پایدار آب شور در نفت می‌شود. اگر فاز آب شور پراکنده از نفت خام جدا نشود، می‌تواند فرایند پالایشگاه را به‌طور جدی مختل کند. در این مطالعه، یک نفت خام شامل قطرات آب نمک پراکنده (امولسیون پایدار)، بر اساس افزایش وزن قطرات پراکنده آب، توسط ذرات میکرونی مغناطیسی پوشش‌یافته با اسید اولئیک امولسیون‌زدایی یا به عبارتی نمک‌زدایی می‌شود. این روش جدید در مقایسه با روش‌های متداول مغناطیسی، الزاماً نه نیازی به اعمال میدان مغناطیسی و نه نیازی به یک افزودنی فعال سطحی دارد. اثر مغناطیسی امولسیون‌زدا منحصرأ می‌تواند برای بازیابی خود آن استفاده شود. اثر هشت عامل شامل زمان استراحت، دما، اسیدیته، زمان اختلاط، ترشوندگی، سرعت اختلاط، غلظت نمک و غلظت امولسیون‌زدا بر راندمان حذف آب با یک طراحی غربالگری (Screening Design) بررسی و ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که تمامی عوامل ذکرشده، مؤثر هستند ولیکن، زمان استراحت، اسیدیته و دما از اهمیت بیشتری برخوردار بودند. این روش با نرخ آگیری بالا، بسیار کارآمد است و کاربردهای بالقوه زیادی برای مصارف تجاری و صنعتی دارد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

### کلید واژگان:

نفت خام  
نمک‌زدایی  
امولسیون  
فصل مشترک  
امولسیون‌زدای مغناطیسی  
مطالعه غربالگری

\*نویسنده مسئول: مهدی قنبری

پست الکترونیکی:

[m-ghanbari@tvu.ac.ir](mailto:m-ghanbari@tvu.ac.ir)



## مقدمه

نفت خام تولیدشده از مخازن نفتی، حاوی مقادیر زیادی آسفالتین، رزین، اسیدهای نفتیک و ذرات جامد است که منجر به تشکیل امولسیون پایدار آب شور در نفت می‌شود. اگر فاز آب شور پراکنده از نفت خام جدا نشود، می‌تواند فرایند پالایشگاه را به‌طور جدی مختل کند. متأسفانه برای نفت‌های با محتوای نمک بالا، روش رایج فرایند نمک‌زدایی الکتروشیمیایی، حتی در دو مرحله نیز قادر به جداسازی قطرات معلق در نفت خام نیست [۱]. بنابراین، روش‌های جداسازی متعددی مانند امولسیون‌زدایی شیمیایی و الکتروشیمیایی، تکنیک‌های رسوب‌دهی گریز از مرکز، عملیات اولتراسونیک [۲-۴]، نمک‌زدایی با تابش مایکروویو [۵؛ ۶] و اخیراً آب‌گیری مغناطیسی پیشنهاد شده‌اند. در میان این روش‌ها، تکنیک امولسیون‌زدایی مغناطیسی اخیراً به‌عنوان یک روش امیدوارکننده مورد توجه قرار گرفته است. این روش مزیت منحصربه‌فرد قابلیت بازیافت امولسیون‌زدا را دارد و در نتیجه سازگار با محیط زیست خواهد بود.

## امولسیون‌زدایی مغناطیسی

فرایند امولسیون‌زدایی مغناطیسی معمول یک امولسیون آب در روغن را می‌توان در سه مرحله اصلی نشان داد: (۱) مغناطیسی‌کردن فاز آب پراکنده با ذرات مغناطیسی عامل‌دارشده (امولسیون‌زدا)، (۲) جداسازی قطرات پراکنده مغناطیسی با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی و (۳) بازیابی امولسیون‌زدا با کمک یک میدان مغناطیسی خارجی. تعداد مقالات در این موضوع، اخیراً با سرعت زیادی در حال انتشار است [۷-۱۲].

پنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] آب را از قیر رقیق‌شده با نفتای سنگین، با استفاده از نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی متصل‌شده به اتیل سلولز، جدا کردند. اتیل سلولز آب‌دوست، برای تقویت میزان انعقاد قطرات استفاده شده است. آنها دریافتند که اتیل سلولز، نقش مهمی در جداسازی در دستیابی به آب‌زدایی ۹۰ درصد دارد. مغناطش فاز داخلی از طریق اختلاط مکانیکی قیر خیس‌شده با نفتا با ذرات مغناطیسی موجود در سوسپانسیون نفتا انجام شد. سپس قطرات آب مغناطیسی‌شده توسط یک آهنربای دستی ته‌نشین شدند. علی<sup>۲</sup> و همکاران [۷] ذرات مغناطیسی میکرونی اکسید آهن پلی متیل متاکریلات-کریلیک اسید-دی ونیل بنزن را به‌عنوان یک امولسیون‌زدا برای خشک‌کردن نفت خام سنگین تولید کردند. آنها بیان کردند که میدان مغناطیسی خارجی، انعقاد قطرات آب را افزایش می‌دهد. فانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] یک امولسیون‌زدا تجاری را که اغلب در صنایع نفت برای جداسازی قطرات آب شور از نفت خام استفاده می‌شود، مغناطیسی کردند. آنها در طول ۱ ساعت به میزان جداسازی نزدیک به ۱۰۰ درصد دست یافتند. با این حال، قابلیت بازیافت امولسیون‌زدا پیشنهادی به طرز ناامیدکننده‌ای کم بود. پس از بازیافت دوم، هیچ مقدار از ماده امولسیون‌زدا در سیستم باقی نماند. فرخی و همکاران [۹] یک نفت خام سبک، متوسط و سنگین را با استفاده از نانوذرات مغناطیسی عامل‌دارشده با باسُرل<sup>۴</sup> پی<sup>۵</sup>، آب‌گیری کردند.

با این حال، روش جداسازی مغناطیسی فوق‌الذکر معمولاً بسیار زمان‌بر است [۱۴]. علاوه بر این، چند مطالعه در مقیاس آزمایشی سیستم جداسازی مغناطیسی نشان داد که حذف مؤثر مغناطیسی قطرات، نیازمند یک میدان مغناطیسی کارآمد بیش از ۱ تسلا است که برای دستیابی به آن محدوده دمایی کمتر از ۸۰ کلین نیاز است؛ این ممکن است به‌طور جدی مانع از کاربرد صنعتی این روش شود [۱۵؛ ۱۶].

<sup>1</sup> Peng

<sup>2</sup> Coalescence

<sup>3</sup> Ali

<sup>4</sup> Fang

<sup>5</sup> Basorol P DB-9935

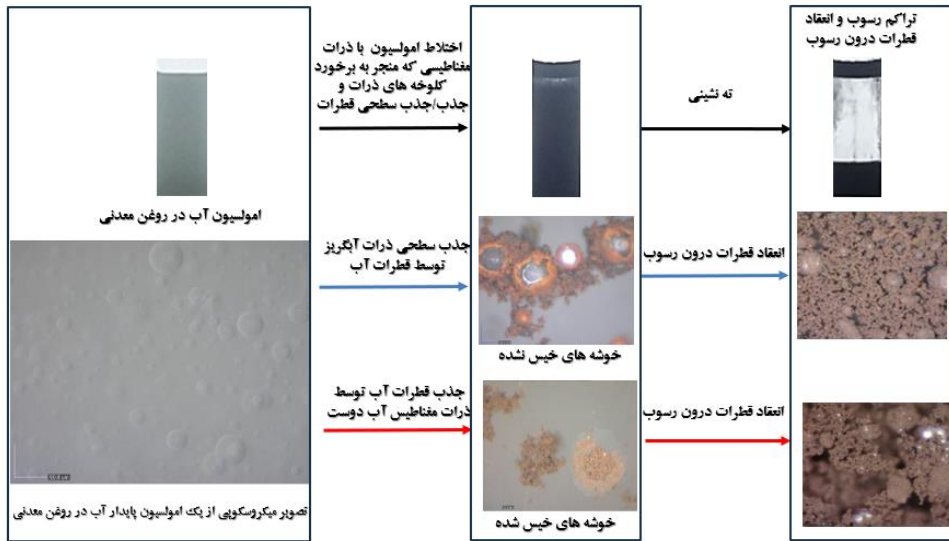
### امولسیون‌زدایی توسط روش تهنشینی ذرات مغناطیسی

قنبری و اسماعیل‌زاده [۱۷] به‌تازگی روش جدیدی را ارائه کردند که لزوماً نیازی به اعمال میدان مغناطیسی و به‌کارگیری افزودنی فعال سطحی برای فرایند امولسیون‌زدایی ندارد. آنها امولسیون‌های روغن در آب و آب در روغن را با افزایش وزن فاز پراکنده توسط جذب فیزیکی-شیمیایی ذرات مغناطیسی بر روی قطرات یا داخل قطرات، امولسیون‌زدایی کردند. بنابراین، نیروی گرانشی رو به پایین، منجر به رسوب همزمان قطرات پراکنده و ذرات مغناطیسی می‌شود. در این روش، پاسخ مغناطیسی یک امولسیون‌زدا منحصرأ می‌تواند برای بازیابی امولسیون‌زدا مورد استفاده قرار بگیرد. این فرایند را می‌توان در سه مرحله اصلی توصیف کرد: (۱) اختلاط ذرات مغناطیسی با امولسیون (۲) تهنشینی شدن قطرات پراکنده سنگین‌شده توسط ذرات مغناطیسی (۳) بازیابی ذرات مغناطیسی با کمک میدان مغناطیسی. مکانیسم این روش در امولسیون‌زدایی یک نفت خام مرطوب در زیر به اختصار بیان شده است [۱۷]. بدیهی است از آنجایی که نمک موجود در نفت خام در آب پراکنده پایدار قرار دارد، حذف قطرات آب، منجر به حذف محتوی نمک نیز خواهد شد بنابراین در این مطالعه، عبارت امولسیون‌زدایی به نمک‌زدایی نیز اطلاق می‌شود.

هنگامی که ذرات مغناطیسی میکرونی با یک نفت خام مرطوب مخلوط شدند، کلوخه‌های آنها با قطرات آب شور پراکنده برخورد می‌کنند. در مورد کلوخه‌های آب‌دوست، قطرات با برخورد به آنها درون‌شان جذب می‌شوند. این تجمع ذرات و قطرات آب، خوشه‌های مرطوب<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. از سوی دیگر، اگر ذرات مغناطیسی آب‌گریز باشند، کلوخه‌ها روی سطح مشترک قطرات پراکنده، جذب می‌شوند تا خوشه‌های خیس‌نشده<sup>۲</sup> را تولید کنند. به عبارت دیگر، خوشه‌های خیس‌شده به تجمع کلوخه‌ها و قطرات پراکنده جذب‌شده در آنها اطلاق می‌گردند. از طرف دیگر، خوشه‌های خیس‌نشده از جذب سطحی کلوخه‌ها بر سطح قطرات پراکنده تولید می‌شوند. مکانیسم مذکور بر اساس مشاهدات نمایش داده‌شده در شکل ۱ از فرایند جداسازی یک نمونه امولسیون آب در روغن معدنی ارائه شده است. تجمع خوشه‌ها یا لخته‌ها ممکن است به دلیل نیروهای جاذبه واندروالس که بین ذرات میکرون و زیر میکرون حاکم است، اتفاق بیفتد [۱۸]. بنابراین، خوشه‌ها شروع به رشد و در نتیجه رسوب می‌کنند. یک فصل مشترک پنهان بین فاز نفت خام و فاز نفت غلیظ از ذرات مغناطیسی ایجاد می‌شود. در حالی که خوشه‌ها/لخته‌ها در پایین ظرف رسوب می‌کنند، یک جریان رو به بالا از فاز پیوسته صورت می‌گیرد. این جریان می‌تواند فرایند جداسازی را با معلق کردن برخی خوشه‌ها یا لخته‌های سبک‌وزن با مشکل روبه‌رو کند (شکل ۲). شدت این جریان‌ها به‌شدت به توزیع اندازه خوشه‌ها/لخته‌ها بستگی دارد [۱۹؛ ۲۰]. وقتی فصل مشترک مذکور به فصل مشترک رسوب فشرده رسید، سرعت رسوب شروع به کاهش می‌کند. در این دوره، مکانیسم رسوب‌گذاری تغییر می‌کند. طی یک حرکت بسیار خفیف به سمت بالا در فاز پیوسته، رسوب بیشتر فشرده می‌گردد و قطرات پراکنده منعقد می‌شوند. ذرات مغناطیسی مستعمل، قابل بازیابی و استفاده مجدد هستند. پاسخ مغناطیسی امولسیون‌زدها روند بازیابی را تسهیل می‌کند تا این یک روش سازگار با محیط زیست باشد.

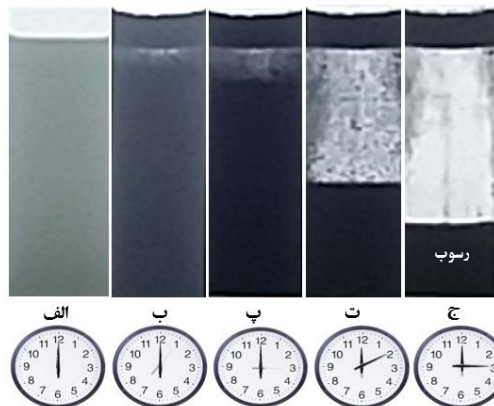
<sup>1</sup> Wetted clusters

<sup>2</sup> Non-wetted clusters



شکل ۱. تصاویر گرفته شده طی فرایند امولسیون زدایی یک امولسیون آب در روغن معدنی.

هدف از این مطالعه، یافتن متغیرهای مهم بین دما، pH، میزان نمک، ترشوندگی مغناطیسی، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و غلظت مغناطیسی در جداسازی امولسیون آب- نفت خام توسط روش ته نشینی ذرات مغناطیسی است. با طراحی فاکتوریل جزئی این مطالعه انجام می گیرد. علاوه بر این، تأثیرات عوامل فوق بر راندمان آب زدایی از نفت خام تخمین زده شد.



شکل ۲. تصاویر فرایند امولسیون زدایی از یک نمونه امولسیون، الف: امولسیون ابتدایی، ب: مدت اندکی پس از اختلاط با ذرات مغناطیسی و شروع فرایند ته نشینی، پ: ظاهر شدن سطح مشترک مایع شفاف (فاز پیوسته) و ذرات مغناطیسی متصل به قطرات پراکنده در حال ته نشینی، ت: معلق شدن برخی خوشه ها یا لخته های سبک وزن توسط جریان رو به بالای فاز پیوسته، ج: تکمیل فرایند امولسیون زدایی با ته نشینی کامل خوشه ها یا لخته های سبک وزن.

## مواد و روش‌ها

## مواد

پودر مغناطیسی میکرونی گرد آب‌دوست<sup>۱</sup> [۲۱; ۲۲] (شکل ۳) از شرکت کیمیا مواد ایران با خلوص بیش از ۹۸ درصد و اندازه متوسط ۲۲۰ نانومتر خریداری گردید (شکل ۴). اسید اولئیک آزمایشگاهی با خلوص بیش از ۹۸ درصد استفاده شد. نمک کلرید سدیم با خلوص بیش از ۹۹/۵ درصد، شرکت مرک آلمان برای ایجاد شوری استفاده شد. نفت خام با خواص ارائه شده در جدول ۱ از میدان نفتی سروستان یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران گرفته شده است. در تمام پژوهش، آب مقطر استفاده شد.

جدول ۱. خواص نفت مورد استفاده در این تحقیق [۲۳].

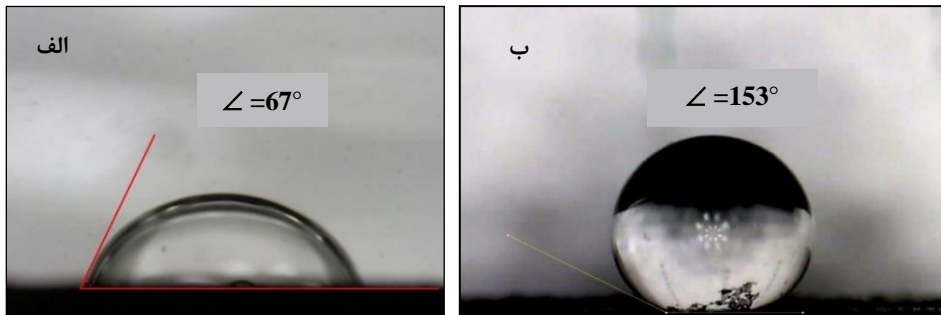
ردیف	خاصیت/غلظت	مقدار	واحد
۱	چگالی	۰.۸۵۲	g/cm <sup>3</sup>
۲	ترکیبات اشباع	۶۷.۷۰	wt. %
۳	آروماتیک‌ها	۳۰.۲۰	wt. %
۴	رزین‌ها	۰.۷۲	wt. %
۵	آسفالتین‌ها	۱.۳۸	wt. %
۶	سولفور	۱.۶۰	wt. %
۷	آب	۰.۱-۰.۲	v/v %
۸	نمک	۰.۷۹۲	g/lit
۹	ذرات جامد	< ۰.۰۱	v/v %
۱۰	گرانروی در ۱۵ °C	۵.۶۳	mPa.s

## روش‌ها

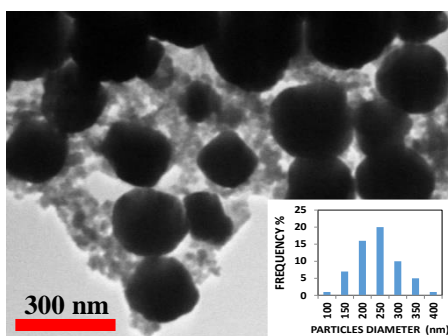
## آماده‌سازی امولسیون

یک امولسیون آب شور در نفت خام با مخلوط کردن ۱۲۰ میلی‌لیتر نفت خام و ۳۰ میلی‌لیتر آب بدون یون تولید شد. با افزودن ۰-۰/۳۸ گرم NaCl، شوری آب تنظیم شد. علاوه بر این، pH آن با افزودن محلول‌های HCl و NH<sub>4</sub>OH بین ۴ تا ۱۰ تنظیم شد. اختلاط با استفاده از همزن مکانیکی آزمایشگاهی<sup>۲</sup> با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه در مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. قطرات آب پراکنده دارای میانگین قطر ساتر<sup>۳</sup> ۱۱/۵۱ میکرومتر بودند (شکل ۵). امولسیون تولیدشده، پایداری نسبتاً خوب بدون شکستگی در مدت حدود یک هفته را داشت.

<sup>۱</sup> Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>۲</sup> Mtops, MS-280D<sup>۳</sup> Sauter Diameter



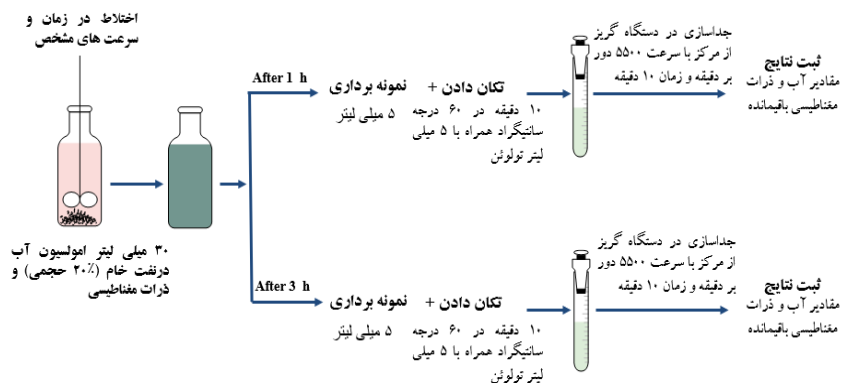
شکل ۳. اندازه‌گیری زاویه تماس، الف: ذرات مغناطیسی بدون پوشش، ب: ذرات پوشش‌یافته با اسید اولئیک توسط روش قطره چسبیده [۲۴]. شایان ذکر است که به دلیل سطح زبر دیسک ذرات مغناطیسی آماده‌شده، میزان زاویه تماس در این روش بیشتر از واقع برآورد می‌شود [۲۲].



شکل ۴. تصویر ذرات مغناطیسی ضبط‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی.



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی امولسیون آب شور در نفت با قطر متوسط ساتر  $11/51 \mu\text{m}$ ؛ طول خط مقیاس آبی‌رنگ در تصویر معادل  $50 \mu\text{m}$  است.



شکل ۶. شمایی از روند فرایند حذف نمک با روش جدید.

### فرایند نمک‌زدایی (شکل ۶)

در یک ویال ۵۰ میلی‌لیتری، مقدار مشخصی از ذرات مغناطیسی به ۳۰ میلی‌لیتر از امولسیون تهیه‌شده اضافه شد. سپس توسط همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰-۱۵۰۰ دور در دقیقه در محدوده دمایی ۶۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد در مدت ۳۰-۲۰ ثانیه مخلوط شدند. کلوخه‌های مغناطیسی، قطرات آب پراکنده را هنگام برخورد با یکدیگر در طول اختلاط جذب کردند. وقتی اختلاط متوقف شد، خوشه‌ها/خسته‌ها در چند دقیقه رسوب کردند و از نفت خام جدا شدند. علاوه بر این، این مخلوط به مدت ۱ یا ۳ ساعت در یک حمام آب با دمای ثابت نگه داشته شد، تا اینکه کلوخه‌های مغناطیسی سبک‌وزن معلق‌شده فرصت یابند توسط نیروی گرانش مجدداً ته‌نشین شوند (شکل ۲). این مدت‌زمان، زمان استراحت نامگذاری شد. در هر یک از این زمان‌ها، ۵ میلی‌لیتر از نفت خام رطوبت‌زدایی‌شده از ویال خارج شد و در یک لوله آزمایش مدرج گریز از مرکز ۱۵ میلی‌لیتری ریخته شدند. نمونه‌ها با ۵ میلی‌لیتر تولوئن مخلوط شدند و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در یک تکان‌دهنده<sup>۱</sup> مجهز به حمام آب دما ثابت<sup>۲</sup> قرار داده شدند. لوله‌ها در نهایت با سرعت ۵۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه گریز از مرکز قرار گرفتند. قطرات آب جدانشده و کلوخه‌ها/خوشه‌های مغناطیسی معلق در پایین لوله‌های گریز از مرکز جمع‌آوری شدند. در نهایت راندمان حذف آب توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{راندمان حذف آب (\%)} = (v_i - v_e) / v_i \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $v_i$  و  $v_e$  به ترتیب حجم اولیه آب پراکنده در ۵ میلی‌لیتر از امولسیون اصلی (یعنی ۱ میلی‌لیتر) و حجم آب جدانشده، یعنی آب جمع‌شده در لوله گریز از مرکز است.

### پوشش ذرات مغناطیسی با اسید اولئیک

به‌منظور ارزیابی تأثیرات ترشوندگی بر حذف آب، ذرات مغناطیسی با اسید اولئیک پوشانده شدند. این کار با استفاده از روش زیر انجام شد [۱۱؛ ۲۵]. طی هم‌زدن با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰۰ گرم اسید اولئیک به تدریج به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب با pH برابر با ۸ (با افزودن محلول آبی هیدروکسید آمونیوم برای تنظیم pH)

<sup>1</sup> Shaker

<sup>2</sup> WiseBath, WSB-18

اضافه شد. هنگامی که اسید اولئیک به طور یکنواخت در آب پراکنده شد، ۵۰ گرم ذرات مغناطیسی به تدریج تحت هم‌زدن مداوم در طول ۱۰ دقیقه به مخلوط اضافه شد. در پایان، هنگامی که مخلوط سرد شد، ذرات مغناطیسی پوشش داده شده با استفاده از آهنربای دائمی جمع‌آوری شدند. ذرات به خوبی با اتانول و آب شسته شدند تا اسید اولئیک اضافی حذف شود. سپس ذرات در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۲۴ ساعت خشک شدند.

### طراحی آزمایش

عوامل مهم در امولسیون‌زدایی هم‌رسوبی نفت خام خیس شده با طراحی فاکتوریل جزئی دومرحله‌ای برای هشت عامل تعیین شد. تمام آزمایش‌ها به صورت تکراری و به صورت تصادفی انجام شدند تا از هر گونه تأثیر طولانی مدت سیستماتیک یک عامل خاص جلوگیری شود. یک طراحی فاکتوریل کاهش یافته که به عنوان وضوح IV شناخته می‌شود، در دو سطح استفاده شد. تأثیرات اصلی و تعاملات دو عاملی از هم جدا می‌شوند، در حالی که ممکن است برهم‌کنش‌های دو عاملی با سایر تعاملات دو عاملی اشتباه گرفته شود. عوامل تجربی و دامنه آنها با توجه به مطالعه قبلی و اسماعیل‌زاده [۱۷] که برای اولین بار روش ته‌نشینی-امولسیون‌زدایی را پیشنهاد کردند، انتخاب شدند. جدول ۲ عوامل انتخاب شده و حوزه آزمایشی آنها را مشخص می‌کند. این طرح منجر به ۳۲ آزمایش شامل سه تکرار از نقاط مرکزی معروف به سطح (۰) شد (جدول ۳).

جدول ۲. فاکتورهای مورد بررسی و دامنه عددی آنها.

واحد	سطح			شناسه فاکتور	فاکتورها
	-۱	۰	۱		
sec	۳۰	۱۱۵	۲۰۰	A	زمان اختلاط
min	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	B	زمان استراحت
-	۰	۱	۲	C	وزن اسید اولئیک / وزن ذرات مغناطیسی
-	۰.۵	۱	۱.۵	D	وزن ذرات مغناطیسی / وزن آب پراکنده
°C	۲۵	۴۲.۵	۶۰	E	دما
rpm	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	F	سرعت اختلاط
mg/lit oil	۳۱.۴	۱۵۸.۲	۲۸۵	G	محتوی نمک
-	۴	۷	۱۰	H	Ph

جدول ۳. ماتریس ترکیب فاکتورها و آزمایش‌های انجام‌شده.

شماره	فاکتورها								پاسخ				
	A	B	C	D	E	F	G	H	باقی مانده آب (mL) تجربی	باقی مانده ذرات (mL) تجربی	باقی مانده ذرات (mL) محاسبه‌شده	حذف آب (%) تجربی	حذف آب (%) <sup>*</sup> محاسبه‌شده
۳۳	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۴۲۵	۵۰	۵۰	۵۲	۵۹
۴	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۴۰۰	۵۰	۵۰	۵۶	۵۹
۳	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۷۵	۰	۰	۹۲	۹۵
۱۲	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۷۵	۰	۰	۹۲	۹۵
۳۴	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۴۰۰	۱۰	۱۰	۵۶	۴۱
۹	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۵۰۰	۱۰	۱۰	۴۴	۴۱
۱۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۹۹
۷	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۹۹
۲۰	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱۰	۱۰	۱۰	۹۹	۹۸
۶	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱۰	۱۰	۱۰	۹۹	۹۸
۱۰	-۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۲۵	۰	۰	۹۷	۹۵
۲۸	-۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۲۵	۰	۰	۹۷	۹۵
۱۷	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۷۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۲	۳۶
۵	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۶۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۸	۳۶
۲۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱۰۰	۰	۰	۸۹	۹۱
۲۵	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱۰۰	۰	۰	۸۹	۹۱
۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۰	۱۰	۱۱	۹۰	۹۰
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰	۱۱	۸۹	۹۰
۱۵	۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۲۴	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۱
۲۶	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۹۹
۲۲	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱۰	۰	۰	۹۹	۹۷
۳۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۲۵	۰	۰	۹۷	۹۷
۲۷	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۳۰۰	۰	۰	۶۷	۶۹
۸	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۲۰۰	۰	۰	۷۸	۶۹

## جدول ۳. ماتریس ترکیب فاکتورها و آزمایش‌های انجام‌شده.

شماره	فاکتورها								پاسخ				
	A	B	C	D	E	F	G	H	باقی مانده آب (mL) تجربی	باقی مانده ذرات (mL) تجربی	باقی مانده ذرات (mL) محاسبه‌شده	حذف آب (%) تجربی	حذف آب (%) محاسبه‌شده
۲۹	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱۱۲.۵	۱۰	۱۰	۸۸	۸۷
۲۳	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۵۰	۱۰	۱۰	۹۴	۸۷
۲	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱۸۷	۰	۰	۷۹	۸۰
۱۸	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۲۷۵	۰	۰	۶۹	۸۰
۳۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۱

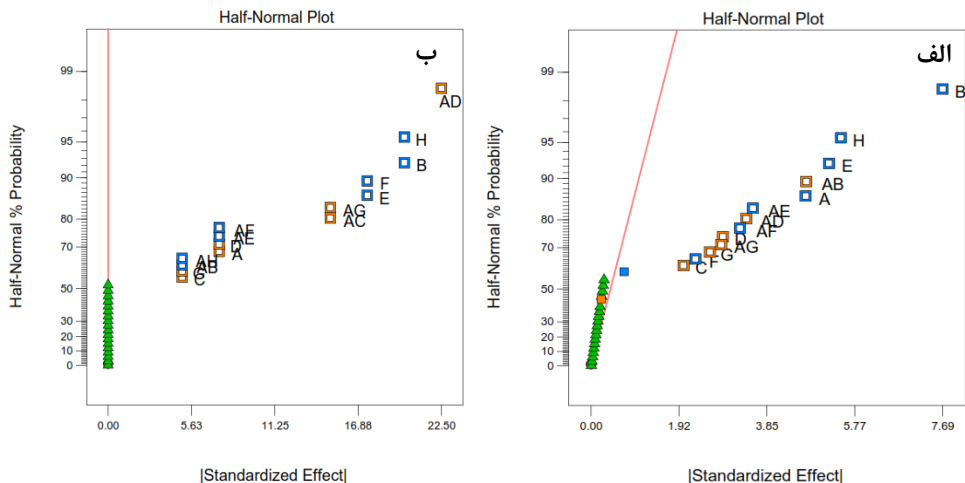
\*حذف آب، توسط نتایج محاسبه آب باقیمانده از مدل توسعه‌یافته به‌دست آمده است. آزمایش‌های شماره (۱۹، ۱۵) (۳۵، ۱) (۱۶، ۲۴) (۱۳، ۲۶) (۳۰، ۱۴) دارای فاکتورها و پاسخ‌های یکسان بوده‌اند.

## نتایج و بحث

تأثیرات هشت عامل مستقل شامل: زمان استراحت، دما، pH، محتوای نمک، ترشوندگی ذرات مغناطیسی، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و غلظت ذرات مغناطیسی با استفاده از طرح فاکتوریل جزئی دوسطحی برای بررسی تأثیرات آنها بر کیفیت رسوب‌گذاری و جداسازی آب در امولسیون نفت خام در نظر گرفته شده است. بر اساس آزمایش‌های طراحی‌شده، مقادیر اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده راندمان جداسازی و باقیمانده ذرات مغناطیسی در فاز پیوسته در جدول ۳ نشان داده شده است.

## نمودار احتمال نیم نرمال - تأثیرات استانداردشده

اهمیت هر متغیر بر روی یک مقادیر پاسخ را می‌توان از طریق نمودار احتمال نیم‌نرمال در شکل ۷ مشاهده کرد. با توجه به این شکل، عوامل بی‌اهمیت در حذف آب کنار خط، نزدیک به صفر هستند در حالی که بیشترین مقدار یعنی B در سمت راست و در دورترین محل از خط نزدیک به صفر می‌باشد. از این‌رو، ترتیب اهمیت در حذف آب عبارت است از: زمان استراحت، pH، دما، زمان اختلاط × زمان استراحت، زمان اختلاط، زمان اختلاط × دما، زمان اختلاط × MW/DW، زمان اختلاط × سرعت اختلاط، MW/DW، زمان اختلاط × شوری، شوری، سرعت اختلاط. اثر زمان اختلاط × pH معنی‌دار نیست. از طرف دیگر، ترتیب اهمیت فاکتورها بر روی ذرات مغناطیسی باقیمانده (شکل ۷ ب) عبارتند از: زمان اختلاط × pH.MW/DWW = زمان استراحت، سرعت اختلاط = دما، زمان اختلاط × شوری = زمان اختلاط × OAW/MW، زمان اختلاط = MW/DWW، زمان اختلاط × دما = زمان اختلاط × سرعت اختلاط، OAW/MW = شوری = زمان اختلاط × زمان استراحت = زمان اختلاط × pH.



شکل ۷. نمودار احتمال نیم نرمال، الف: آب شور باقیمانده و ب: باقیمانده ذرات در فاز نفت خام آب زدایی شده.

### تجزیه و تحلیل انووا

تجزیه و تحلیل واریانس انووا<sup>۱</sup> با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش<sup>۲</sup> نسخه ۷.۱.۵ برای یافتن فاکتورهای معنی دار آماری ( $P < 0.05$ ) انجام شد. جدول ۴ و ۵ جداول تجزیه و تحلیل انووا را نشان می دهد که آزمون های معناداری مدل رگرسیون، اهمیت انحنا و آزمون فقدان برازش<sup>۳</sup> را خلاصه می کند.

جدول ۴. نتایج انووا برای مدل فاکتوریل جزئی (تابع پاسخ ذرات مغناطیسی باقی مانده).

Analysis of variance						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	Prob > F	Significance
Model	۲۱۵۵۰.۰۰	۱۵	۱۴۳۶.۷	۶.۳۶۶E+۷	< ۰.۰۰۰۱	significant
Curvature	۳۴۷.۱۴	۱	۳۴۷.۱۴	۶.۳۶۶E+۷	< ۰.۰۰۰۱	significant
Pure error	۰.۰۰	۱۸				
Cor. total	۲۱۸۹۷.۱۴	۳۴				
R-squared						
	Adeq Precision	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared		
Values	-	۱	۱	۱		

<sup>۱</sup> ANOVA

<sup>۲</sup> Design-Expert

<sup>۳</sup> lack-of-fit

## جدول ۵. نتایج انووا برای مدل فاکتوریل جزئی (تابع پاسخ آب باقی مانده).

Analysis of variance						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	Prob > F	Significance
Model	۱۸۲۰.۸۳	۳	۱۴۰.۰۶	۱۱۶.۵۵	<۰.۰۰۰۱	significant
Curvature	۰.۵۴		۰.۵۴	۰.۴۵	۰.۵۱۱۸	not significant
Residual	۲۴.۰۳	۲۰	۱.۲۰			
Lack of fit	۴.۵۷	۲	۲.۲۹	۲.۱۲	۰.۱۴۹۵	not significant
Pure error	۱۹.۴۶	۸	۱.۰۸			
Cor. total	۱۸۴۵.۴۰	۳۴				
R-squared						
	Adeq Precision	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared		
Values	۳۲.۷۰	۰.۹۸۷	۰.۹۷۹	۰.۹۵۹		

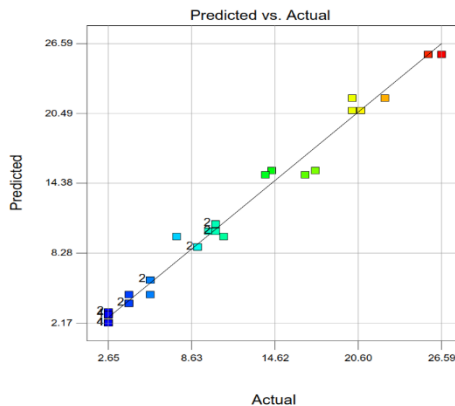
## باقی مانده آب

مربع آر<sup>۱</sup> محاسبه شده: ۰/۹۸۷. به طور منطقی نزدیک به ۱ نشان می دهد که ۹۸/۷ درصد از تغییرپذیری پاسخ را می توان به طور منطقی توسط مدل پیش بینی کرد. مربع آر تعدیل پذیر<sup>۲</sup>، ۰/۹۸۷ با مربع آر پیش بینی شده<sup>۳</sup>، ۰/۹۵۹ مطابقت خوبی دارد. دقت کافی<sup>۴</sup> ۳۲/۷ که بالاتر از ۴ است، نشان دهنده سیگنال مناسب در مقایسه با نویز است. بنابراین، مدل پیشنهادی را می توان برای هدایت پاسخ در فضای طراحی به کار گرفت. مقدار<sup>۵</sup> p کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده یک منبع بی اهمیت است. بنابراین برای آب باقی مانده، میزان انحنای در فضای طراحی، نسبت به مقدار پارازیت<sup>۶</sup> قابل توجه نیست. علاوه بر این، فقدان برازش، نسبت به خطای خالص، ناچیز است.

نمودار احتمال نرمال باقیمانده<sup>۷</sup>ها در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط روی خط، به عنوان نشانه ای از توزیع نرمال خطاها با میانگین صفر و ثابت به نمایش درآمده اند. علاوه بر این، نمودار باقیمانده<sup>۸</sup> برحسب متغیر پاسخ خروجی، یک الگوی بدون ساختار از نقاط توزیع شده در بالا و پایین محور ایکس را بدون توجه به مقادیر کم تا زیاد مقادیر پاسخ نشان می دهد. بنابراین، فرض واریانس ثابت برآورده شد. در مجموع، می توانیم اطمینان یابیم که مدل پیشنهادی بدون هیچ انتظار تناقضی در پیش بینی های آتی، مناسب است. شکل ۹ مقادیر پاسخ پیش بینی شده را در مقابل مقادیر واقعی آنها

<sup>1</sup> R-squared<sup>2</sup> Adjustable R-Squared<sup>3</sup> Predicted R-Squared<sup>4</sup> Adequate precision<sup>5</sup> P-value<sup>6</sup> Noise<sup>7</sup> normal probability plot of the residuals<sup>8</sup> Plot of residual

نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل توسعه‌یافته می‌تواند دامنه پاسخ را به‌طور مناسب توضیح دهد. معادله رگرسیون برای پسماند آب که توسط نرم‌افزار برحسب فاکتورهای کدگذاری شده به شرح معادله ۲ است.



شکل ۹. نمودار مقادیر پیش‌بینی‌شده برحسب مقادیر واقعی در مقیاس تغییر یافته (آب باقیمانده).

$$(2) \quad (7 + \mu\text{l})^{0.5} = 9.74 - 2.35A - 3.85B + 1.01C + 1.44D - 2.06E - 1.14F + 1.30G - 2.37H + 2.35AB + 1.70AD - 1.77AE - 1.63AF$$

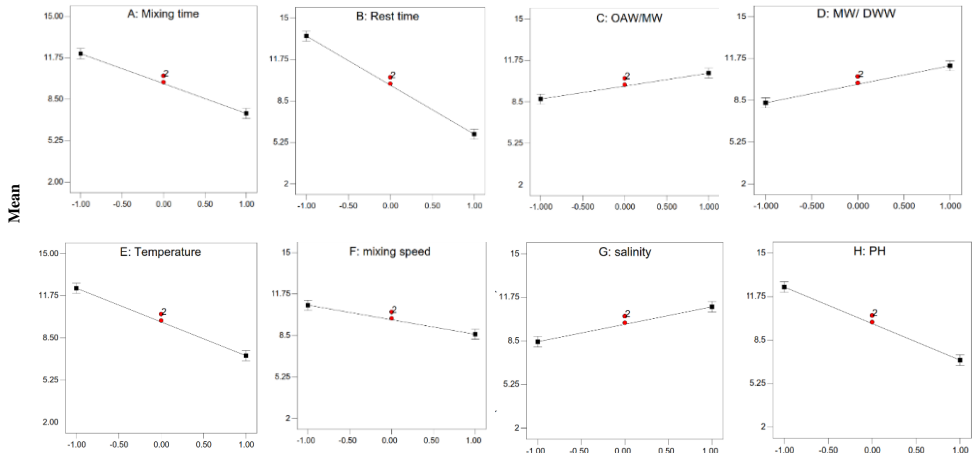
### باقیمانده ذرات مغناطیسی

مربع آر، مربع آر تعدیل‌پذیر و مربع آر پیش‌بینی‌شده، برای این پاسخ برابر با ۱ است. اگرچه، این وضعیت در طرح‌های آزمایشی غیرمعمول است ولی نشان از برازش کامل دارد بنابراین کلیه باقیمانده‌ها صفر هستند و بنابراین، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها و نمودار باقیمانده در مقابل خروجی به ترتیب یک خط عمودی و افقی هستند. اگرچه، انحنای قابل توجه بود ( $P < 0.05$ )، بعداً نشان داده خواهد شد که مدل خطی می‌تواند به اندازه کافی باقیمانده ذرات مغناطیسی را پیش‌بینی کند. معادله رگرسیون برای باقیمانده ذرات مغناطیسی برحسب فاکتورهای کدگذاری شده به شرح معادله ۳ است.

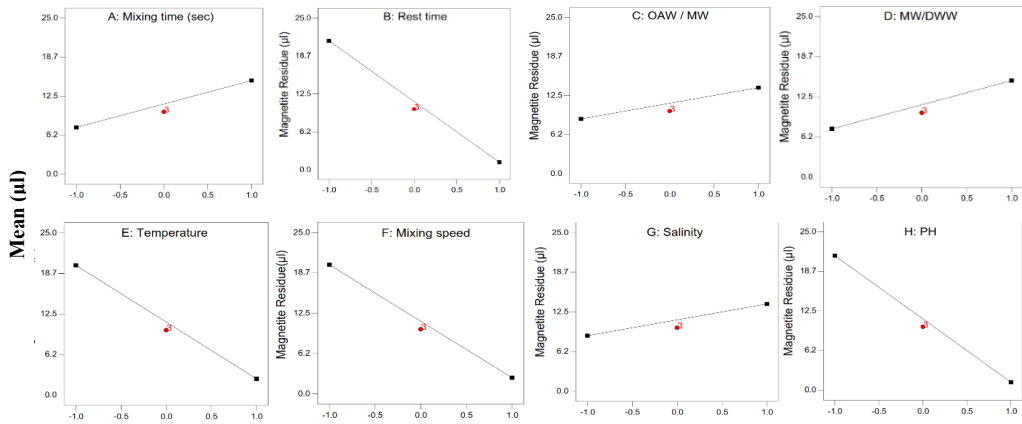
$$(3) \quad \text{ذرات مغناطیسی باقیمانده } (\mu\text{l}) = 11.25 + 3.75A - 10.00B + 2.50C + 3.75D - 8.75E - 8.75F + 2.50G - 10.00H - 2.50AB + 7.50AC + 11.25AD - 3.75AE - 3.75AF + 7.50AG - 2.50AH$$

### تأثیرات اصلی، میانگین و تعامل

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقادیر میانگین پاسخ‌های خروجی را در سطوح مختلف فاکتورها نشان می‌دهند. شیب منحنی‌ها را می‌توان به‌عنوان مقیاس برای قدرت نسبی اثر عوامل در نظر گرفت. بنابراین، B: زمان استراحت و C: OAW/MW به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر حذف آب شور از نفت خام با روش هم‌رسوب‌گذاری داشتند. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود این عوامل تأثیرات مشابهی بر میزان باقیمانده ذرات مغناطیسی در فاز نفت داشتند.



شکل ۱۰. مقادیر پاسخ متوسط برای آب شور باقیمانده ( $\mu\text{L}$ ) در مقیاس تبدیل شد. نمودارها برای C و G آثار اصلی و بدون برهمکنش هستند.



شکل ۱۱. مقادیر پاسخ متوسط برای ذرات مغناطیسی باقیمانده ( $\mu\text{L}$ ) در مقیاس تبدیل شد.

با توجه به اینکه C: OAW/MW و H:pH شامل برهمکنش برای حذف آب شور نبودند، تفسیر نمودارهای آنها مجاز است. راندمان آزدایی نفت خام با ذرات مغناطیسی آب‌گریز کاهش یافت. این به این دلیل است که خوشه‌های معلق غیرمرطوب تولیدشده توسط کلوخه‌های مغناطیسی آب‌گریز با سرعت کمتری نسبت به خوشه‌های تولیدشده توسط کلوخه‌های آب‌دوست ته‌نشین می‌شوند. بنابراین، میزان ذرات مغناطیسی معلق به شکل کلوخه به همراه قطرات آب در فاز نفت خام افزایش یافته است (شکل ۱۱). بنابراین، هنگامی که نفت خام برای تجزیه و تحلیل محتوای آب آن سانتریفیوژ شد، کلوخه‌ها (باقی‌مانده‌های ذرات مغناطیسی) فشرده شدند و قطرات آب شور را دفع کردند.

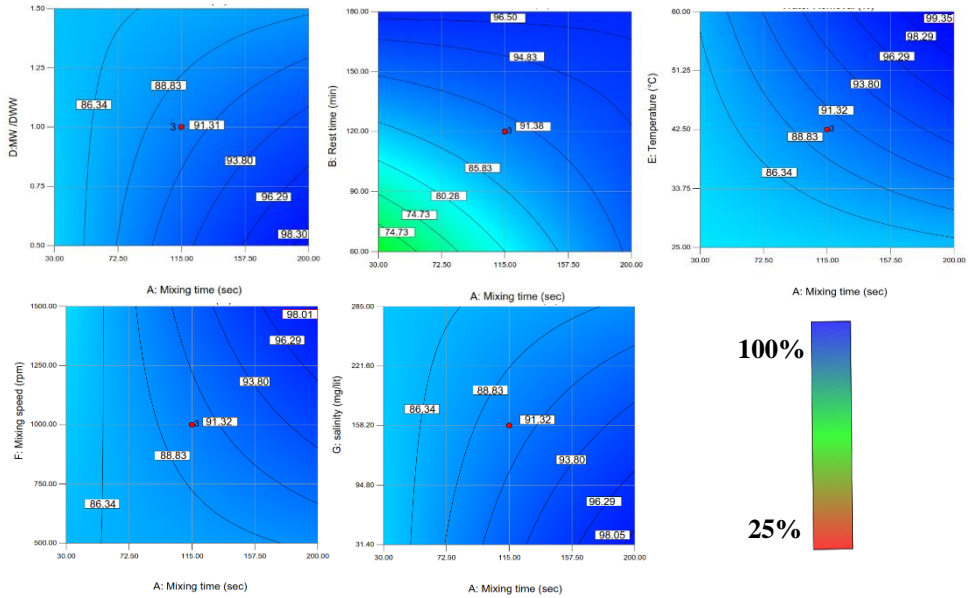
حذف آب شور، با افزایش pH قطرات پراکنده افزایش یافت. این را می‌توان به افزایش نرخ ته‌نشینی خوشه‌های معلق در فاز نفت خام در شرایط بازی<sup>۱</sup> نسبت داد. زاویه تماس ذرات مغناطیسی پوشش داده‌شده با اسید اولئیک در شرایط بازی کاهش می‌یابد [۱۱].

### تأثیرات متقابل

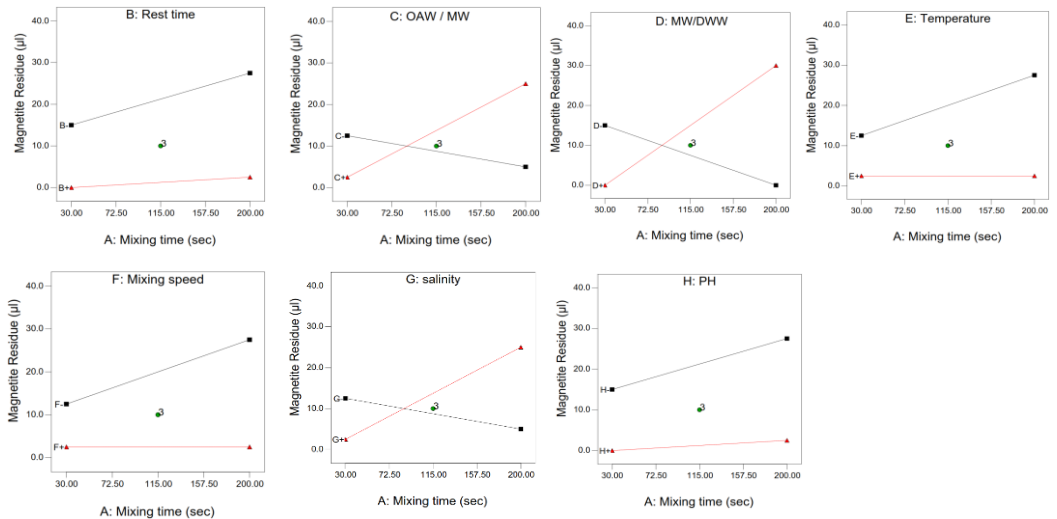
شکل ۱۲، تأثیرات برهمکنش پارامترها بر حذف آب شور را نشان می‌دهد. هرچه زمان استراحت بیشتر و زمان اختلاط بیشتر باشد منجر به حذف آب شور بیشتری می‌شود. به عبارت دیگر، برای کاهش زمان استراحت (یعنی کاهش اندازه ظرف)، زمان اختلاط بالاتر لازم است. زمان اختلاط بالاتر منجر به کاهش توزیع اندازه ذرات رسوب‌کننده یعنی کلوخه‌های مغناطیسی خیس شده می‌شود. در نتیجه، یک فصل مشترک تیز<sup>۲</sup> بین فاز نفت پاک‌شده و دوغاب (فاز رسوب‌کننده) به دلیل کاهش جریانات رو به بالا ایجاد می‌شود (شکل ۱۲ را مشاهده کنید). بنابراین، بقایای کلوخه‌های مغناطیسی ولگرد متصل به قطرات آب شور در فاز نفت، کاهش و راندمان حذف آب شور افزایش می‌یابد. اکنون مشخص می‌شود که با نیل به زمان اختلاط بالا همراه با MW/DWW کم، دمای بالا، سرعت اختلاط بالا و شوری کم می‌توان به حذف آب بسیار بالایی دست یافت. شکل ۱۳ را می‌توان به‌منظور تخمین تأثیرات متغیرها بر روی باقیمانده ذرات مغناطیسی استفاده کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود انحنای قابل صرف‌نظر است. هرچه A: زمان استراحت، E: دما، F: سرعت اختلاط و H: pH بالاتر باشد، ذرات باقیمانده مغناطیسی در نفت خام رطوبت‌زدایی‌شده، به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. مطابق با مکانیسم پیشنهادی، این اتفاق در مورد آب باقیمانده نیز مشاهده شد. بنابراین، هر زمان که باقیمانده ذرات مغناطیسی در فاز نفت کاهش یابد، حذف آب نیز افزایش می‌یابد. حذف آب با افزایش دما افزایش یافت. با توجه به این واقعیت که ویسکوزیته نفت خام با دما کاهش می‌یابد، بنابراین زمان استراحت [۱۷] (مدت زمان سپری‌شده تا رسوب تمام کلوخه‌ها/خوشه‌ها) نیز با دما کاهش می‌یابد. سرعت اختلاط و زمان اختلاط هر دو اثر موازی بر حذف آب دارند. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، از نمودار AC مشخص است که افزایش زمان اختلاط می‌تواند در کاهش باقیمانده ذرات مغناطیسی آب‌دوست مفید باشد. این به این دلیل است که ذرات پراکنده‌شده آب‌دوست، تمایل کمتری به فاز پیوسته دارند و بنابراین سریع‌تر از ذرات آب‌گریز رسوب می‌کنند. نمودار AD نشان می‌دهد که افزایش D: MW/DWW به سطح بالای خود در طول افزایش زمان اختلاط منجر به افزایش باقیمانده مغناطیسی می‌شود. در سطح شوری بالا، افزایش زمان اختلاط منجر به افزایش کلوخه‌های مغناطیسی مرطوب معلق در فاز روغن شد. این مطابق با نتایج نمودار AG حذف آب می‌باشد؛ با این استدلال که افزایش باقی‌مانده ذرات مغناطیسی منجر به کاهش حذف آب می‌شود.

<sup>1</sup> Basic

<sup>2</sup> Sharp



شکل ۱۲. برهمکنش‌ها در میزان حذف آب (درصد).



شکل ۱۳. برهمکنش پارامترها بر مقدار باقی مانده ذرات مغناطیسی در فاز نفت خام.

نتایج نشان داد که با افزایش شوری فاز آبی، حذف آب کاهش یافت. این با یافته‌های لیانگ و همکاران [۱۱] در امولسیون‌زدایی مغناطیسی سیکلوهگزان در آب با استفاده از نانومغناطیسی پوشیده‌شده با اسید اولئیک مطابقت دارد. در سطوح بالای: B: زمان استراحت، E: دما، F: سرعت اختلاط و H: pH، زمان اختلاط اثر ناچیزی بر باقیمانده ذرات مغناطیسی داشت.

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یک روش جدید برای نمک‌زدایی از نفت خام استفاده شده است. این روش مبتنی بر افزایش وزن قطرات آب شور پراکنده با استفاده از ذرات مغناطیسی میکرونی است. این روش لزوماً نیازی به اعمال میدان مغناطیسی برای حذف امولسیون ندارد، نیازمند افزودن ماده فعال سطحی نیز نیست. با این حال، پاسخ مغناطیسی ذرات، فرصتی را برای بازیافتشان فراهم می‌کند. اثرات هشت عامل شامل زمان اختلاط، زمان استراحت، دما، سرعت اختلاط، pH، شوری، ترشوندگی و غلظت ذرات مغناطیسی با استفاده از طراحی فاکتوریل جزئی توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش نسخه ۷.۱.۵ بر راندمان حذف آب شور و باقیمانده ذرات مغناطیسی در فاز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تمام اثرات اصلی مهم هستند و ترتیب پنج عامل مهم‌تر برای حذف آب عبارتند از: زمان استراحت، pH، دما، زمان اختلاط × زمان استراحت و زمان اختلاط. از سوی دیگر، این ترتیب برای باقیمانده مغناطیسی زمان اختلاط × MW/DWW، زمان استراحت، pH، درجه حرارت، سرعت اختلاط بود. نتایج نشان داد هر زمان که بقایای ذرات مغناطیسی در فاز نفت خام کاهش یافت، باقیمانده آب نیز کاهش یافت. مقادیر بالاتر زمان اختلاط، سرعت اختلاط، دما و زمان استراحت باعث افزایش حذف آب شد. در مجموع، این روش با نرخ آگیری نزدیک به ۱۰۰ درصد بسیار کارآمد نشان داد و کاربرد بالقوه‌ای در فرایند نمک‌زدایی از نفت خام خواهد داشت.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه فنی و حرفه‌ای برای حمایت از این تحقیق سپاسگزاری می‌کنند.

## References

- [1] Ye, G., Lu, X., Peng, F., Han, P., & Shen, X. (2008). Pretreatment of Crude Oil by Ultrasonic-electric United Desalting and Dewatering. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(4), 564-569. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60122-6](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60122-6)
- [2] Antes, F. G., Diehl, L. O., Pereira, J. S. F., Guimarães, R. C. L., Guarnieri, R. A., Ferreira, B. M. S., & Flores, E. M. M. (2017). Effect of ultrasonic frequency on separation of water from heavy crude oil emulsion using ultrasonic baths. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 541-546. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.03.031>
- [3] Pedrotti, M. F., Enders, M. S. P., Pereira, L. S. F., Mesko, M. F., Flores, E. M. M., & Bizzi, C. A. (2018). Intensification of ultrasonic-assisted crude oil demulsification based on acoustic field distribution data. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.056>
- [4] Wang, Z., Gu, S., & Zhou, L. (2018). Research on the static experiment of super heavy crude oil demulsification and dehydration using ultrasonic wave and audible sound wave at high temperatures. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 1014-1020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.037>
- [5] Assenheimer, T., Barros, A., Kashefi, K., Pinto, J. C., Tavares, F. W., & Nele, M. (2017). Evaluation of Microwave and Conventional Heating for Electrostatic Treatment of a Water-in-Oil Model Emulsion in a Pilot Plant. *Energy & Fuels*, 31(6), 6587-6597. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00275>
- [6] Martínez-Palou, R., Cerón-Camacho, R., Chávez, B., Vallejo, A. A., Villanueva-Negrete, D., Castellanos, J., Karamath, J., Reyes, J., & Aburto, J. (2013). Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating. *Fuel*, 113, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>

- [7] Ali, N., Zhang, B., Zhang, H., Li, W., Zaman, W., Tian, L., & Zhang, Q. (2015). Novel Janus magnetic micro particle synthesis and its applications as a demulsifier for breaking heavy crude oil and water emulsion. *Fuel*, 141, 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.026>
- [8] Duan, M., Xu, Z., Zhang, Y., Fang, S., Song, X., & Xiong, Y. (2017). Core-shell composite nanoparticles with magnetic and temperature dual stimuli-responsive properties for removing emulsified oil. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.02.017>
- [9] Farrokhi, F., Jafari Nasr, M. R., Rahimpour, M. R., Arjmand, M., & Vaziri, S. A. (2018). Application of a novel magnetic nanoparticle as demulsifier for dewatering in crude oil emulsion. *Separation Science and Technology*, 53(3), 551-558. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1373676>
- [10] Li, S., Li, N., Yang, S., Liu, F., & Zhou, J. (2014). The synthesis of a novel magnetic demulsifier and its application for the demulsification of oil-charged industrial wastewaters. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(1), 94-99. <https://doi.org/10.1039/C3TA12952G>
- [11] Liang, J., Li, H., Yan, J., & Hou, W. (2014). Demulsification of Oleic-Acid-Coated Magnetite Nanoparticles for Cyclohexane-in-Water Nanoemulsions. *Energy & Fuels*, 28(9), 6172-6178. <https://doi.org/10.1021/ef501169m>
- [12] Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., & Masliyah, J. (2012). Novel Magnetic Demulsifier for Water Removal from Diluted Bitumen Emulsion. *Energy & Fuels*, 26(5), 2705-2710. <https://doi.org/10.1021/ef2014259>
- [13] Fang, S., Chen, B., Chen, T., Duan, M., Xiong, Y., & Shi, P. (2017). An innovative method to introduce magnetism into demulsifier. *Chemical Engineering Journal*, 314, 631-639. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.023>
- [14] Lü, T., Zhang, S., Qi, D., Zhang, D., Vance, G. F., & Zhao, H. (2017). Synthesis of pH-sensitive and recyclable magnetic nanoparticles for efficient separation of emulsified oil from aqueous environments. *Applied Surface Science*, 396, 1604-1612. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.223>
- [15] Oka, T., Itoh, Y., Yanagi, Y., Yoshikawa, M., Ikuta, H., & Mizutani, U. (2000). Construction of a 2-5 T class superconducting magnetic field generator with use of an Sm123 bulk superconductor and its application to high-magnetic field demanding devices. *Physica C: Superconductivity*, 335(1-4), 101-106. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00152-0)
- [16] Oka, T., Yokoyama, K., Itoh, Y., Ikuta, H., Mizutani, U., Okada, H., Katagiri, K., & Noto, K. (2003). Construction of a strong magnetic field generator with use of melt-processed bulk superconductors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Applied Superconductivity*, 13(2), 1584-1587. <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.812796>
- [17] Ghanbari, M., & Esmaeilzadeh, F. (2019). Demulsification by increasing the gravitational force acting upon the dispersed phase owing to the adsorption/absorption of the magnetite particles. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(11), 1581-1590. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1518144>
- [18] Bishop, K. J. M., Wilmer, C. E., Soh, S., & Grzybowski, B. A. (2009). Nanoscale Forces and Their Uses in Self-Assembly. *Small*, 5(14), 1600-1630. <https://doi.org/10.1002/sml.200900358>

- [19] Bürger, R. (2000). Phenomenological foundation and mathematical theory of sedimentation–consolidation processes. *Chemical Engineering Journal*, 80(1-3), 177-188. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00089-7)
- [20] Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R., & Harker, J. H. (1991). *Particle Technology and Separation Processes* (4 ed.). Pergamon Press. <https://books.google.com/books?id=hbTAAAAAAAJ>
- [21] Bi, H., Xie, X., Yin, K., Zhou, Y., Wan, S., He, L., Xu, F., Banhart, F., Sun, L., & Ruoff, R. S. (2012). Spongy Graphene as a Highly Efficient and Recyclable Sorbent for Oils and Organic Solvents. *Advanced Functional Materials*, 22(21), 4421-4425. <https://doi.org/10.1002/adfm.201200888>
- [22] Levkin, P. A., Svec, F., & Fréchet, J. M. J. (2009). Porous Polymer Coatings: a Versatile Approach to Superhydrophobic Surfaces. *Advanced Functional Materials*, 19(12), 1993-1998. <https://doi.org/10.1002/adfm.200801916>
- [23] Roshan, N., Ghader, S., & Rahimpour, M. R. (2018). Application of the response surface methodology for modeling demulsification of crude oil emulsion using a demulsifier. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(5), 700-710. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1385480>
- [24] Yuan, Y., & Lee, T. R. (2013). Contact Angle and Wetting Properties. In G. Bracco & B. Holst (Eds.), *Surface Science Techniques* (pp. 3-34). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1_1)
- [25] Viali, W. R., Alcantara, G. B., Sartoratto, P. P. C., Soler, M. A. G., Mosiniewicz-Szablewska, E., Andrzejewski, B., & Morais, P. C. (2010). Investigation of the Molecular Surface Coating on the Stability of Insulating Magnetic Oils. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(1), 179-188. <https://doi.org/10.1021/jp908732b>